

02 P 13053



R1

①9 **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 17 014 A 1**

⑤① Int. Cl.7:
G 01 M 1/30
B 23 Q 11/00
B 23 Q 5/54

②① Aktenzeichen: 100 17 014.5
②② Anmeldetag: 5. 4. 2000
④③ Offenlegungstag: 18. 10. 2001

DE 100 17 014 A 1

⑦① Anmelder:
Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart Stiftung des
öffentlichen Rechts, 70569 Stuttgart, DE

⑦④ Vertreter:
Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80538 München

⑦② Erfinder:
Scheurer, Friedrich, 73035 Göppingen, DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:

DE	198 21 854 C1
DE	24 55 279 C2
DE	44 34 166 A1
DE	43 37 001 A1
DE	40 28 522 A1
DE	40 24 328 A1
DE	37 42 149 A1
DE	37 20 746 A1
US	48 99 628
US	45 77 535
WO	9 73 832 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Auswuchtvorrichtung und -verfahren

⑤⑦ Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Auswuchten von rotierenden Gegenständen, insbesondere in Bearbeitungszentren zur Bohr- und Fräsbearbeitung, mit wenigstens einem am rotierenden Gegenstand mit radialem Abstand von dessen Drehachse und mit axialem Abstand von dessen freiem Ende anbringbaren Aktuator, der zum Einstellen einer Auswuchtkrümmung des Gegenstandes in Abhängigkeit von der gemessenen Unwucht zu axialen Stellbewegungen ansteuerbar ist. Die Erfindung betrifft außerdem eine Bearbeitungsmaschine mit einer derartigen Auswuchtvorrichtung sowie ein Auswuchtverfahren.

Wichtung

DE 100 17 014 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Auswuchten von rotierenden Gegenständen, insbesondere in Bearbeitungszentren zur Bohr- und Fräsbearbeitung.

[0002] Die Erfindung betrifft außerdem eine Bearbeitungsmaschine mit zumindest einem rotierenden Gegenstand und wenigstens einer Auswuchtvorrichtung, sowie ein Auswuchtverfahren.

[0003] Insbesondere in Hochleistungsbearbeitungszentren, die zur spanenden Bearbeitung von Bauteilen beispielsweise in der Automobilindustrie zunehmend eingesetzt werden, können unterschiedliche Werkzeuge auswechselbar mit direkt angetriebenen Wellen gekoppelt werden, die auch als Motorspindeln bezeichnet werden. Für jeden Bearbeitungsvorgang kann hierbei ein spezielles Werkzeug eingewechselt werden. Zur Erzielung maximaler Zerspanungsleistungen soll mit möglichst hohen Drehzahlen der Welle gearbeitet werden. Bei derartigen schnellaufenden Systemen sind Unwuchten unvermeidbar, die insbesondere durch Toleranzen an der Schnittstelle zwischen dem Werkzeug und der Welle bedingt sind und die Bearbeitungsgenauigkeit beeinträchtigen. Die durch die Unwucht hervorgerufene Exzentrizität an der Spitze des Werkzeugs nimmt mit dessen Länge zu, was bei weit auskragenden Werkzeugen, die vor allem bei der Bohr- und Fräsbearbeitung zum Einsatz kommen, zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Bearbeitungsgenauigkeit führt. Außerdem erhöhen die durch die Unwucht hervorgerufenen Kräfte, deren Größe proportional zum Quadrat der Drehzahl ist, die Belastung der Wellenlager.

[0004] Bekannte Auswuchtsysteme, wie beispielsweise in der WO 96/17294 beschrieben, haben den Nachteil, daß zusätzliche Massen in das rotierende System eingebracht werden, die störende Zusatz-Trägheitsmomente zur Folge haben. Außerdem erfolgt die Auswuchtung nur punktuell in einer einzigen senkrecht zur Drehachse verlaufenden Ebene. Bei hydraulischen Auswuchtsystemen ist von Nachteil, daß diese häufig nicht reversibel betrieben werden können und zur Entleerung bzw. Rücksetzung vorübergehend außer Betrieb gesetzt werden müssen. Nachteilig an mit relativ geringen Antriebskräften und stark untersetzenden Getrieben arbeitenden elektromechanischen Systemen ist, daß bei hohen Drehzahlen die Getriebe zum Verklemmen neigen, da die hohen Reibungskräfte von den Antrieben nicht mehr überwunden werden können.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Möglichkeit zu schaffen, die Unwucht an rotierenden Gegenständen möglichst weitgehend zu beseitigen, wobei dies insbesondere an rotierenden Systemen mit einer angetriebenen schnellaufenden Welle und einem mit der Welle gekoppelten Werkzeug von vergleichsweise großer Länge möglich sein soll, und zwar mit einem minimalen zusätzlichen Trägheitsmoment und bei minimalen Auswuchtzeiten, und wobei dies insbesondere außerdem automatisch, reversibel und in jedem Betriebszustand möglich sein soll.

[0006] Die Lösung dieser Aufgabe erfolgt durch die Merkmale des Vorrichtungsanspruchs 1 und insbesondere dadurch, daß die Auswuchtvorrichtung wenigstens einen am rotierenden Gegenstand mit radialem Abstand von dessen Drehachse und mit axialem Abstand von dessen freiem Ende anbringbaren Aktuator aufweist, der zum Einstellen einer Auswuchtkrümmung des Gegenstandes in Abhängigkeit von der gemessenen Unwucht zu axialen Stellbewegungen ansteuerbar ist.

[0007] Erfindungsgemäß kann der rotierende Gegenstand an einer von seinem freien Ende entfernten Bereich mit Hilfe des Aktuators gezielt in Abhängigkeit von der jeweili-

gen Unwucht gekrümmt werden. Das freie Ende des rotierenden Gegenstandes, beispielsweise eine Werkzeugspitze, wird durch dieses Verbiegen des Gegenstandes in Richtung der Drehachse bewegt.

[0008] Der Aktuator wirkt somit als ein Biegeaktuator, der dem rotierenden Gegenstand an der Stelle, wo die durch die Stellbewegungen hervorgerufenen Stellkräfte auf den Gegenstand einwirken, eine Gelenkeigenschaft verleiht. Durch die Erfindung wird der rotierende Gegenstand daher mit einem Festkörpergelenk versehen. Der Abschnitt des Gegenstandes zwischen dem Gelenkbereich und dem freien Ende kann gezielt zu Auswuchtbewegungen veranlaßt werden, die zu einer Minimierung der Unwucht führen.

[0009] Ein wesentlicher Vorteil der Erfindung besteht darin, daß die einstellbare Auswuchtkrümmung oder Auswuchtbiegung des rotierenden Gegenstandes über die gesamte Länge des Bereiches zwischen der Stelle, an welcher die Krümmung bzw. Biegung erfolgt, und dem freien Ende des Gegenstandes wirksam ist. Es findet somit keine punktuelle Auswuchtung lediglich in einer senkrecht zur Drehachse verlaufenden Ebene statt, sondern es erfolgt eine Minimierung des gesamten Exzentrizitätsverlaufs des rotierenden Gegenstandes zwischen der Biegestelle und dem freien Ende.

[0010] Besonders vorteilhaft ist die Erfindung daher an langgestreckten rotierenden Gegenständen einsetzbar.

[0011] In einem bevorzugten praktischen Ausführungsbeispiel der Erfindung handelt es sich bei dem rotierenden Gegenstand um eine direkt antreibbare Spindel eines Hochleistungsbearbeitungszentrums, die an ihrem freien Ende mit einem auswechselbaren Werkzeug gekoppelt ist, das an einem direkt mit der Welle gekoppelten Träger angebracht ist. Die Werkzeugspitze bildet somit das freie Ende des rotierenden Gesamtgegenstandes.

[0012] Hauptursache für die Unwucht derartiger rotierender Systeme ist der insbesondere durch Planlauffehler verursachte Winkelversatz zwischen der Spindel und dem Werkzeug bzw. dem Träger. Dieser Winkelversatz entsteht an der Schnittstelle zwischen der Spindel und dem jeweils direkt mit der Spindel gekoppelten Bauteil.

[0013] Die negativen Auswirkungen der Unwucht dieses Gesamtsystems sind um so größer, je länger das Werkzeug und je schlanker und elastischer die Welle ist. Die insbesondere bei der Bohr- und Fräsbearbeitung benötigten, relativ weit auskragenden Werkzeuge und die relativ elastischen Wellen führen zu einer ausgeprägten Reaktion auf die Anregung durch die Unwucht. Verstärkt wird dieses Problem durch eine angestrebte Massearmut der jeweiligen Maschine, deren damit verbundene geringere dynamische Steifigkeit zu größeren Relativverlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück führt.

[0014] Diese negativen Auswirkungen der Unwucht können durch die erfindungsgemäße Auswuchtung minimiert werden, die vom Bereich der durch den Aktuator hervorgerufenen Krümmung bis zur Werkzeugspitze wirksam ist.

[0015] Von besonderem Vorteil ist daher der Einsatz der erfindungsgemäßen Auswuchtvorrichtung an weit auskragenden Werkzeugen mit einem großen Länge/Durchmesser-Verhältnis.

[0016] Vorzugsweise wird der Aktuator im Bereich dieser Schnittstelle zwischen Welle und Werkzeug bzw. Träger angeordnet, wodurch der rotierende Gesamtgegenstand an der Stelle gekrümmt werden kann, an der mit dem Winkelversatz zwischen Welle und Werkzeug bzw. Träger die auszugleichende Unwucht ihre Hauptursache hat.

[0017] Durch die Krümmung oder Biegung des Gegenstandes im Bereich der Schnittstelle wird somit in vorteilhafter Weise eine Auswuchtwirkung über die gesamte

Werkzeuglänge erzielt. Dies ist insbesondere bei vergleichsweise langen und schlanken Werkzeugen von Vorteil, da der für die Unwucht verantwortliche Winkelversatz an der Schnittstelle bei weit auskragenden Werkzeugen besonders ausgeprägte exzentrische Bewegungen der Werkzeugspitze um die Drehachse zur Folge hat.

[0018] Unter der Voraussetzung des für die Unwucht hauptsächlich verantwortlichen Fehlers aus dem Planlauf an der Schnittstelle werden somit durch die erfindungsgemäße Auswuchtvorrichtung die geometrischen Verhältnisse im rotierenden System insgesamt verbessert, während bei der mit herkömmlichen Masseausgleichssystemen bewirkten Einebenenauswucht lediglich punktuelle Verbesserungen erzielt werden, die lediglich zu einer Verringerung der Unwuchtreaktion führen können, jedoch keine Verbesserung der Geometrie zur Folge haben.

[0019] Erfindungsgemäß können die nachteiligen Folgen der Unwucht also auch an Stellen – nämlich an der Werkzeugspitze – beseitigt werden, an denen ein direkter Eingriff beispielsweise durch eine punktuelle Einebenenauswuchtung nicht möglich ist.

[0020] Vorzugsweise ist der Aktuator an der Welle anbringbar und somit auf der vom Werkzeug abgewandten Seite der Schnittstelle zwischen Welle und Werkzeug bzw. Träger. Hierdurch ist der Aktuator dem von Werkzeugwechseln nicht betroffenen Teil des rotierenden Gesamtgegenstandes zugeordnet. Dabei ist es bevorzugt, wenn der Aktuator im bezüglich der Wellenlagerung auskragenden Bereich der Welle angeordnet ist, wodurch ungünstige Verspannungen in der Lagerung vermieden werden.

[0021] Bevorzugt wird der Aktuator dabei im Bereich der Außenwand des rotierenden Gegenstandes und somit in einem relativ großen Abstand zur Drehachse angeordnet, wodurch eine für die Erzielung hoher Biegekräfte günstige Geometrie vorhanden ist.

[0022] Gemäß einer weiteren praktischen Ausführungsform der Erfindung sind mehrere Aktuatoren vorgesehen, die in Umfangsrichtung insbesondere gleichmäßig verteilt am rotierenden Gegenstand anbringbar sind. Hierdurch entsteht eine ringartige Aktuatorstruktur um die Drehachse, bei der beispielsweise drei jeweils um 120° voneinander beabstandete Aktuatoren vorgesehen sein können. Grundsätzlich kann jede beliebige Anzahl von Aktuatoren vorgesehen sein, und es ist auch möglich, die Aktuatoren ungleichmäßig verteilt anzuordnen. Die jeweilige Geometrie wird bei der Ansteuerung der Aktuatoren durch eine entsprechende Transformation zwischen den Aktuatorpositionen und den beiden unabhängigen Freiheitsgraden der Krümmung bzw. Biegung des Gegenstandes berücksichtigt. Die Freiheitsgrade sind Drehungen um die beiden senkrecht zur Drehachse und senkrecht zueinander verlaufenden Achsen, um welche der Gegenstand mittels der Aktuatoren gekrümmt werden kann.

[0023] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung handelt es sich bei den Stellbewegungen um Längenänderungen des Aktuators. Dabei ist in einer bevorzugten praktischen Ausführung vorgesehen, daß der Aktuator zumindest ein piezoelektrisches Element umfaßt. Hierbei kann es sich beispielsweise um einen Piezostapelaktuator aus einer Vielzahl von stapelartig angeordneten piezoelektrischen Einzelelementen handeln.

[0024] Bei derartigen Festkörperaktuatoren ist von Vorteil, daß bei minimalem Eigengewicht und daher minimalem zusätzlichen Trägheitsmoment, bei minimalen Ansprechzeiten, minimalem Verschleiß und maximaler Belastbarkeit ein Steilsystem mit einer extrem hohen Kraft- und Leistungsdichte vorhanden ist.

[0025] Des weiteren ist von Vorteil, daß keine bewegli-

chen Teile vorhanden sind. Es besteht somit keine Klemm- oder Blockiergefahr.

[0026] Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Piezoaktuatoren besteht darin, daß diese gegebenenfalls isoliert werden können und deren zuvor eingestellte Längenänderung auf diese Weise vorübergehend gehalten werden kann. Im Fall von Betriebsstörungen kann somit der Auswuchtzustand eine ausreichend lange Zeit beibehalten werden, um z. B. ein sicheres Herunterfahren der jeweiligen Bearbeitungsmaschine zu gewährleisten.

[0027] Da die Piezoaktuatoren aufgrund ihrer bezogen auf die hohe Kraft- und Leistungsdichte minimalen Masse problemlos in das rotierende System integriert werden können, ergibt sich insbesondere auch im Hinblick auf die minimalen Ansprechzeiten der Piezoaktuatoren die Möglichkeit, diese zur aktiven Dämpfung innerhalb des rotierenden Systems einzusetzen. Hierdurch werden insbesondere bei hohen Drehzahlen störende Phasendrehungen vermieden, die bei anderen, in den Lagern oder sonstigen stationären Teilen des Systems angeordneten Dämpfungseinrichtungen auftreten.

[0028] In einem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel umfaßt die erfindungsgemäße Auswuchtvorrichtung eine insbesondere induktiv arbeitende Übertragungseinheit zur berührungslosen Ansteuerung des Aktuators.

[0029] Dabei ist vorzugsweise vorgesehen, daß die Übertragungseinheit einen Rotorabschnitt zur gemeinsamen Drehung mit dem rotierenden Gegenstand und einen bezüglich des rotierenden Gegenstandes stationären Statorabschnitt aufweist. Eine zuverlässige Übertragung von Steilsignalen an den Aktuator ist hierdurch auch bei extrem hohen Drehzahlen gewährleistet.

[0030] Um die Unwucht zu bestimmen und den Aktuator zur Ausführung von kompensierenden Stellbewegungen entsprechend ansteuern zu können, ist vorzugsweise eine Meßanordnung vorgesehen, mit der den rotierenden Gegenstand betreffende Weg- bzw. Verschiebungs- und/oder Beschleunigungsdaten ermittelt werden können.

[0031] Hierzu werden Wege bzw. Verschiebungen vom feststehenden Teil des Gesamtsystems zum rotierenden Teil und/oder Beschleunigungen am feststehenden Teil als Reaktion auf über die Lager übertragene Anregungs- bzw. Stützkkräfte gemessen.

[0032] Die Lösung der der Erfindung zugrundeliegenden Aufgabe erfolgt außerdem gemäß Anspruch 10 durch eine Bearbeitungsmaschine, insbesondere eines Bearbeitungszentrums zur Bohr- und Fräsbearbeitung, die zumindest einen rotierenden Gegenstand und wenigstens eine erfindungsgemäße Auswuchtvorrichtung aufweist.

[0033] Der rotierende Gegenstand der Bearbeitungsmaschine umfaßt bevorzugt eine Welle in Form einer direkt antreibbaren Spindel sowie ein auswechselbar mit der Spindel koppelbares Werkzeug, das an einem direkt mit der Spindel gekoppelten Träger angebracht ist.

[0034] Dabei ist vorzugsweise vorgesehen, daß der Aktuator in axialer Richtung zwischen einer Stirnfläche, z. B. einer Ringschulter, des Trägers und einem bezüglich des werkzeugseitigen Wellenendes axial beabstandeten Abschnitt der Welle angeordnet ist. Bei axialer Ausdehnung des von der Drehachse beabstandeten Aktuators beaufschlagt dessen eines Ende den Träger – und damit eine Planfläche der Trenn- bzw. Schnittstelle zwischen Träger und Welle – und dessen anderes Ende die Welle. Da die Welle und der Träger in axialer Richtung durch ein Spannsystem fest miteinander gekoppelt sind, resultieren die vom Aktuator aufgetragenen Stellkräfte in einem Biegemoment, durch das die Welle in dem axialen Bereich, längs welchem sich der Aktuator erstreckt, gekrümmt wird. Der Aktuator wirkt

somit auf zwei gleichwertige, senkrecht zur Drehachse verlaufende und axial beabstandete Stützflächen des rotierenden Gesamtgegenstandes.

[0035] Die Werkzeugschulter kann auf diese Weise durch eine Stellbewegung des Aktuators in Richtung der Drehachse gebogen werden.

[0036] Alternativ wäre es erfindungsgemäß grundsätzlich auch möglich, den Aktuator zwischen zwei axial beabstandeten Abschnitten der Welle anzuordnen und somit bei einer Längenvergrößerung ausschließlich auf die Welle einwirken zu lassen.

[0037] Wenn die Auswuchtvorrichtung mehrere in Umfangsrichtung verteilt angeordnete Aktuatoren umfaßt, dann werden diese bevorzugt gleichsinnig angesteuert. Im Fall von Piezostapelaktuatoren erfährt somit jeder Aktuator eine Längenvergrößerung. Richtung und Ausmaß der Auswuchtkrümmung können durch unterschiedlich große Längenänderungen der einzelnen Aktuatoren gezielt eingestellt werden. Vorzugsweise werden wenigstens drei in Umfangsrichtung gleichmäßig verteilt angeordnete Aktuatoren eingesetzt, so daß eine zur gezielten Einstellung der benötigten Auswuchtkrümmung vorteilhafte symmetrische Anordnung vorhanden ist.

[0038] Des weiteren ist bevorzugt vorgesehen, daß der Aktuator über den mit der Welle gekoppelten Träger oder das mit der Welle gekoppelte Werkzeug vorgespannt ist. Die Vorspannung kann z. B. von einem zentral angeordneten Spannsystem aufgebracht werden. Für Piezoaktuatoren schädliche Zugbeanspruchungen können hierdurch sicher verhindert werden.

[0039] Die Lösung der der Erfindung zugrundeliegenden Aufgabe erfolgt außerdem gemäß Anspruch 19 durch ein Verfahren zum Auswuchten von rotierenden Gegenständen, bei dem die Unwucht des rotierenden Gegenstandes gemessen und der rotierende Gegenstand mit wenigstens einem in Abhängigkeit von der gemessenen Unwucht ansteuerbaren Aktuator gekrümmt wird. Bevorzugt ist es dabei, wenn der rotierende Gegenstand in einem von dessen Drehachse radial und von dessen freiem Ende axial beabstandeten Bereich gekrümmt wird.

[0040] Vorzugsweise wird das Auswuchtverfahren automatisch und insbesondere während einer Beschleunigungsphase und/oder unmittelbar im Anschluß an die Beschleunigungsphase des rotierenden Gegenstandes durchgeführt.

[0041] Die automatische Auswuchtung minimiert die Auswuchtzeit und garantiert eine hohe Flexibilität. Die Auswuchtung während der Beschleunigungsphase oder unmittelbar im Anschluß daran ermöglicht eine optimale Identifizierung der Unwucht und vermeidet unproduktive Totzeiten einer den rotierenden Gegenstand umfassenden Bearbeitungsmaschine.

[0042] Weitere bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung sind auch in den Unteransprüchen, der Beschreibung sowie der Zeichnung angegeben.

[0043] Die Erfindung wird im folgenden beispielhaft unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben, deren einzige Figur in einer geschnittenen Seitenansicht eine an einer Welle und einem Träger eines Hochleistungsbearbeitungszentrums vorgesehene Auswuchtvorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung zeigt.

[0044] Die auch als Motorspindel bezeichnete hohle Welle 12 ist über einen in der Figur nicht dargestellten Antriebsbereich direkt antreibbar und kann für maximale Drehzahlen von mehr als 30.000 U/min ausgelegt sein.

[0045] Über ihr in der Figur linkes Ende ist die Welle bzw. Spindel 12 mit einem als Spannfutter ausgebildeten Träger 13 gekoppelt, an dem ein als Kopplungsabschnitt dienender, genormter Hohlchaftkegel 18 ausgebildet ist. Der Träger

13 trägt an seinem nicht dargestellten linken Endbereich ein Werkzeug, z. B. ein Bohr- oder Fräswerkzeug.

[0046] Zur Kopplung mit der Welle 12 wird der Träger 13 mit seinem Hohlchaftkegel 18 in das Wellenende eingesteckt und mit einem nicht dargestellten zentralen Spannsystem, das die Hohlräume in der Welle 12 und im Träger 13 ausnutzt, in die Welle 12 hineingezogen. Im dargestellten eingespannten Zustand liegt der Träger 13 mit einer Ringschulter 15 an der Stirnseite der Welle 12 an. Außerdem liegt der Träger 13 mit der Außenseite des Hohlchaftkegels 18 an der abgeschrägten Innenwand des Endbereiches der Welle 12 an.

[0047] Im Bereich ihres innen abgeschrägten Endes ist die Welle 12 an der Außenwand mit mehreren taschenartigen Aufnahmebereichen versehen. In einer bevorzugten Ausführungsform weist die Welle 12 drei in Umfangsrichtung gleichmäßig verteilte Aufnahmebereiche auf. Die Aufnahmebereiche sind in Form von Aussparungen in der Wandung der Welle 12 vorgesehen.

[0048] Jeder Aufnahmebereich begrenzt einen sich in axialer Richtung erstreckenden Aufnahmeraum von vergleichsweise geringer radialer Höhe, der von einem darin angeordneten Piezostapelaktuator 16 im wesentlichen vollständig ausgefüllt ist.

[0049] Die Piezoaktuatoren 16 sind jeweils über eine werkzeugseitig offene Seite des Aufnahmebereiches einführbar und liegen jeweils mit ihrem antriebsseitigen Ende am senkrecht zur Drehachse 14 verlaufenden Boden des Aufnahmebereiches an. Die Länge der Aktuatoren 16 ist derart bemessen, daß sie zwischen dem Träger 13 und dem die Aufnahmebereiche axial begrenzenden Abschnitt 26 der Welle 12 eingeklemmt sind, so daß die Aktuatoren 16 bereits im nicht angesteuerten Zustand unter Vorspannung stehen.

[0050] In der radial äußeren Begrenzungswand jedes Aufnahmebereiches ist eine Öffnung 32 ausgebildet. Durch diese Fenster 32 wird gezielt eine Schwächung der Welle 12 im Bereich der Aktuatoren 16 bewirkt. Die Öffnungen 32 sind in radialer Richtung durch ein Sicherungsorgan in Form einer die Spindel 12 umgebenden zylindrischen Abdeckhülse 34 verschlossen. Die Abdeckhülse 34 ist am Wellenende aufgefressen und erfährt über die Aktuatorlänge keine Biegung. Im Bereich der Öffnungen 32 ist die Abdeckhülse 34 mit einem geringfügig, z. B. um einige 1/10 mm, größeren Innendurchmesser versehen, so daß die Aktuatoren 16 nicht überbrückt werden.

[0051] Durch die Abdeckhülse 34 wird verhindert, daß Gußmaterial, mit dem die Piezoaktuatoren 16 zwecks Fixierung in den Aufnahmebereichen eingegossen sind, durch die im Betrieb auftretenden Zentrifugalkräfte aus den Aufnahmebereichen herausgetrieben wird.

[0052] Ein Vorteil der ringförmigen Anordnung der Aktuatoren 16 ist, daß zentral angeordnete Einrichtungen der Spindel 12 wie z. B. das erwähnte Spannsystem zur Fixierung des Trägers 13 sowie Mittel zur Zufuhr von Kühl-, Schmier- und Reinigungsmedien nicht beeinträchtigt werden.

[0053] Die bereits erwähnte Abdeckhülse 34 sowie weitere bezüglich der Welle 12 und des Trägers 13 konzentrisch angeordnete Komponenten, die im folgenden beschrieben werden, sind auf der in der Figur unteren Seite der Welle 12 und des Trägers 13 lediglich durch gestrichelte Linien teilweise angedeutet.

[0054] Die Piezoaktuatoren 16 sind Teil eines erfindungsgemäßen Auswuchtsystems, das außerdem eine berührungslos arbeitende Übertragungseinheit 23, 25 zur Ansteuerung der Piezoaktuatoren 16 mit verstärkten Stellsignalen umfaßt. Zum einen weist die Übertragungseinheit einen Rotorabschnitt 23 auf, der an der antriebsseitigen Stirnfläche eines

im Betrieb gemeinsam mit der Spindel 12 rotierenden, in dieser Ausführungsform zur Erleichterung der Montage geteilten Rotors 22a, 22b angebracht ist. Der Rotor umfaßt zwei Rotorringe 22a, 22b, die über eine Verschraubung drehfest miteinander verbunden sind. Die axiale Lage des Rotors wird von einem auf die Spindel 12 geschraubten Halteorgan in Form einer Mutter 36 gesichert, die am antriebsseitigen Rotorring 22b anliegt. In dieser Stellung liegt der Rotor mit dem antriebsseitigen Rotorring 22b an einer Ringschulter 17 der Spindel 12 an.

[0055] Zum anderen umfaßt die Übertragungseinheit einen Statorabschnitt 25, der an der werkzeugseitigen und somit dem Rotorabschnitt 23 zugewandten Stirnfläche eines bezüglich der rotierenden Spindel 12 stationären Stators 24 angebracht ist.

[0056] Ein Ringraum des Stators 24 zur Aufnahme von im folgenden näher erläuterten Umsetzern 48 ist antriebsseitig von einer ringförmigen Abdeckung 42 abgedeckt. Des weiteren grenzt antriebsseitig an den Stator 24 ein Lagerschild 38 an, das gleichzeitig als Adapter zur Anpassung an das nicht dargestellte Spindelgehäuse dient.

[0057] Bohrungen, die zur Aufnahme von Verbindungsleitungen bzw. einer Steckverbindung 45 zwischen den Leitungen in den Rotorringen 22a, 22b ausgebildet sind, sind durch Abdichtstopfen 46 verschlossen.

[0058] Im werkzeugseitigen Rotorring 22a sind außerdem mehrere in Umfangsrichtung verteilt angeordnete radiale Auswuchtbohrungen 44 ausgebildet.

[0059] Der Rotorabschnitt 23 und der Statorabschnitt 25, zwischen denen lediglich ein kleiner axialer Spalt vorhanden ist, bilden ein mehrkanaliges Mittelfrequenzübertragungssystem. Jedem Kanal dieses Systems ist ein mit dem jeweiligen Umsetzer 48 verbundener, extern angeordneter Mittelfrequenzverstärker (nicht dargestellt) zugeordnet, mit dem zunächst dem Stator 24 zugeführte Stellsignale zur Ansteuerung der Aktuatoren 16 verstärkt und über den Umsetzer 48 an den Statorabschnitt 25 übermittelt werden, mit dem sie berührungslos zum Rotorabschnitt 23 übertragen werden. Die Mittelfrequenzverstärker werden von einer mikroprozessorunterstützten zentralen Steuereinheit (nicht dargestellt) über eine Signalschnittstelle angesteuert.

[0060] Mit diesem Übertragungssystem, in dem jedem Aktuator 16 ein Kanal zugeordnet ist, wird für jeden Kanal eine Wechselspannung induziert. Die induzierten Wechselspannungen werden gleichgerichtet und dienen zur Ansteuerung der Piezostapelaktuatoren 16. Die Gleichrichter sind jeweils Bestandteil einer im Rotorring 22b angeordneten elektronischen Baugruppe 49, die außerdem eine Entladelektronik umfaßt.

[0061] Die auf diese Weise für jeden Kanal individuell einstellbaren Längenänderungen der Piezoaktuatoren 16 werden in Abhängigkeit von einer an die zentrale Steuereinheit angeschlossenen Meßanordnung erzeugt. Diese Meßanordnung umfaßt mehrere nicht dargestellte Sensoren, die an über den feststehenden Teil der Gesamtanordnung in geeigneter Weise verteilten Meßstellen angeordnet sind. Bevorzugt werden die Sensoren im Bereich des den Aktuatoren 16 nächstgelegenen Lagers (nicht dargestellt) angeordnet.

[0062] Mit den Sensoren werden vorzugsweise wenigstens vier unabhängige Signale ermittelt, welche für beide Komponenten (radialer Versatz und Winkelversatz) der Unwucht die Anteile bezüglich der beiden Freiheitsgrade (Drehungen um orthogonale Achsen senkrecht zur Drehachse) repräsentieren. Aus diesen vier Signalen können die Auswirkungen der Unwucht durch Messen der Wege bzw. Verschiebungen und/oder Beschleunigungen an den Stellen der Sensoren erfaßt werden.

[0063] Dabei sind die Weg- bzw. Verschiebungssignale

für eine Auswertung im niedrigen Frequenzbereich und die Beschleunigungssignale im hohen Frequenzbereich der vorgesehenen Bandbreite vorgesehen.

[0064] Gemäß einem möglichen Sensorkonzept werden Wege bzw. Verschiebungen vom feststehenden Teil der Gesamtanordnung zur Welle 12 an wellennahen Meßstellen gemessen. Um vier unabhängige Beschleunigungssignale zu erhalten, erfolgen in zwei axial beabstandeten, senkrecht zur Drehachse verlaufenden Ebenen, insbesondere in zwei Lagerebenen an den Lagerschilden, jeweils 2-Komponenten-Beschleunigungsmessungen in Richtung der beiden orthogonalen, senkrecht zur Drehachse verlaufenden Querachsen. Die Beschleunigungsmessungen werden bevorzugt außerhalb des Gehäuses und z. B. mittels piezoelektrischer Inertialaufnehmer durchgeführt. Alternativ oder zusätzlich zu den Beschleunigungsmessungen können z. B. mit scheibenförmigen Piezoelementen, die in das Gehäuse integriert sind, Kräfte bzw. Dehnungen in Trennfugen beispielsweise zwischen dem Lagerschild 38 und dem Gehäuse gemessen werden. Die gemessenen Kräfte sind insbesondere die beiden Querkraftkomponenten in Richtung der beiden orthogonalen, senkrecht zur Drehachse verlaufenden Querachsen sowie die Momente um diese Querachsen. Auf diese Weise werden ebenfalls vier unabhängige Signale erhalten.

[0065] Erfindungsgemäß wird nach jedem Werkzeugwechsel automatisch ein Auswuchtvorgang durchgeführt. Das Auswuchten kann während der Beschleunigungsphase der Spindel 12 erfolgen oder in die anschließende Betriebsphase hineinreichen oder ausschließlich im Anschluß an die Beschleunigungsphase erfolgen.

[0066] Hierzu werden mit den erwähnten Sensoren der Meßanordnung laufend Weg- bzw. Verschiebungsdaten und/oder Beschleunigungsdaten des Gesamtsystems aufgenommen, welche die momentanen Unwuchtverhältnisse repräsentieren. Diese Daten werden der zentralen Steuereinheit zur Verfügung gestellt, die in einer die Geometrie der Aktuator-Ringstruktur berücksichtigenden Transformation automatisch für jeden Piezoaktuator 16 ein Stellsignal berechnet und diese Stellsignale über die erwähnte Schnittstelle an die Mittelfrequenzverstärker und Umsetzer 48 der Übertragungseinheit übermittelt.

[0067] Die von den Verstärkern über die Umsetzer 48 bereitgestellten Leistungen werden von der mehrkanaligen Übertragungseinheit 23, 25 berührungslos auf das rotierende System übertragen und im Anschluß an eine Gleichrichtung in Form von Gleichspannungs-Stellsignalen den Piezoaktuatoren 16 zugeführt.

[0068] Auf diese Weise kann die zentrale Steuereinheit gezielt Stellbewegungen in Form von Längenänderungen der einzelnen Aktuatoren 16 hervorrufen. Dabei erfolgt die Ansteuerung derart, daß durch die Stellsignale stets eine Längenvergrößerung der Piezoaktuatoren 16 bewirkt wird.

[0069] Die zwischen dem Wellenabschnitt 26 und dem Träger 13 eingeklemmten und auf diese Weise vorgespannten Aktuatoren 16 bringen jeweils in ihrem Bereich ein elastisches Biegemoment auf die Welle 12 auf, die hierdurch gekrümmt wird. Da die Welle 12 und der Träger 13 axial fest durch das zentrale Spannsystem miteinander verbunden sind, stellen Welle 12, Träger 13 und Werkzeug hinsichtlich der Aktuatoren 16 einen einzigen rotierenden Gegenstand dar, der in dem axialen Teilbereich gekrümmt wird, in dem die Aktuatoren 16 angeordnet sind. Die aufgrund der vom zentralen Spannsystem aufgebrachten Spannkraft feste axiale Verbindung zwischen Träger 13 und Welle 12 kann von den Aktuatoren 16 nicht gelöst werden.

[0070] Für die Entstehung der Krümmung der Welle 12 kommt es nur auf eine ausreichend feste axiale Verbindung der Teile an, zwischen denen die Aktuatoren 16 angeordnet

sind, und es ist unerheblich, ob die Aktuatoren zwischen zwei separaten Teilen oder zwei Abschnitten eines einzigen Teils angeordnet sind. Die Krümmung des rotierenden Gesamtgegenstandes wird in jedem Fall durch ein rückgeschlossenes Biegemoment auf dem vom Aktuator einge-

nommenen axialen Teilbereich des Gesamtgegenstandes bewirkt.
[0071] Die in der beschriebenen Ausführungsform vorgenommene Anordnung der Aktuatoren im Bereich der Schnittstelle erfolgt nicht deshalb, um durch direktes Beaufschlagen des Trägers 13 dieses gegenüber der Welle 12 zu verkippen, sondern um eine Krümmung des rotierenden Gesamtgegenstandes im Bereich derjenigen axialen Stelle hervorzurufen, an der ein die Hauptursache für die zu beseitigende Unwucht darstellender Winkelversatz im rotierenden Gesamtgegenstand, hier zwischen Welle 12 und Träger 13, auftreten kann.

[0072] Grundsätzlich ist es erfindungsgemäß auch möglich, die Aktuatoren 16 bezüglich der Schnittstelle werkzeugseitig, nämlich am Träger 13, anzubringen und somit eine ebenfalls zu einer Geometrieverbesserung des rotierenden Gesamtgegenstandes führende Krümmung des Trägers 13 zu bewirken.

[0073] Indem unterschiedlich große Längenänderungen an den einzelnen Aktuatoren 16 hervorgerufen werden, kann der störende Winkelversatz gezielt im Bereich seiner Entstehung kompensiert werden. Die Spindel 12 erfährt im axialen Bereich der Aktuatoren 16 jeweils eine resultierende Krümmung bzw. Durchbiegung, die über die axiale Länge des Aktuators 16 zu einem Kompensationswinkel aufintegriert wird. Dies hat eine sich über die gesamte Werkzeuglänge auswirkende Geometrieänderung am rotierenden System zur Folge, wodurch die zu mit der erwähnten Meßanordnung nachweisbaren Auswirkungen führende Unwucht minimiert wird.

[0074] Die Krümmung der Welle 12 durch die Piezoaktuatoren 16 wird durch die Schwächung der Welle 12 aufgrund der Öffnungen 32 an den Aufnahmebereichen begünstigt.

[0075] Die Piezoaktuatoren 16 sind derart bemessen bzw. angeordnet, daß der Träger 13 auf die Aktuatoren 16 Druck ausübt, so daß die Aktuatoren 16 bereits im nicht angesteuerten Zustand unter einer leichten Vorspannung stehen. Hierdurch werden zum einen Zugbeanspruchungen der Aktuatoren 16 vermieden, und zum anderen ist eine optimale Kraftübertragung bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte gewährleistet, die zu minimalen Ansprechzeiten des erfindungsgemäßen Auswuchtsystems führt.

[0076] Es steht somit ein geschlossener Regelkreis zur Verfügung, der es ermöglicht, von der Meßanordnung nachgewiesenen, durch eine vorhandene Unwucht hervorgerufenen Störungen sofort mittels der Aktuatoren 16 entgegenzuwirken und die Unwucht mit einem geeigneten Regel-Algorithmus zu minimieren.

[0077] Auf diese Weise kann durch die Erfindung ein der Hauptursache für die Unwucht bildende Winkelversatz zwischen Spindel 12 und Träger 13 korrigiert werden. Mit den an der Schnittstelle angeordneten Aktuatoren 16 wird der Unwucht am Ort ihrer Entstehung entgegengewirkt, indem die Spindel 12 entsprechend gekrümmt wird. Diese Krümmung wirkt sich auf die gesamte Werkzeuglänge aus und hat somit eine wesentliche Geometrieverbesserung zur Folge.

[0078] Bei einem Ausfall der Leistungsversorgung beispielsweise aufgrund einer Betriebsstörung können die Aktuatoren 16 isoliert werden, wodurch der sich durch eine minimale Unwucht auszeichnende Zustand "eingefroren" wird. Dieser Zustand kann problemlos für eine zum sicheren

Herunterfahren der Bearbeitungsmaschine ausreichende Zeitdauer gehalten werden.

Bezugszeichenliste

- 12 Welle, Spindel
- 13 Träger
- 14 Drehachse
- 15 Schulter des Trägers
- 16 Aktuator, Piezostapelaktuator
- 17 Schulter der Welle
- 18 Schnittstelle, Kopplungsabschnitt, Hohlchaftkegel
- 22a Rotorring
- 22b Rotorring
- 23 Rotorabschnitt der Übertragungseinheit
- 24 Stator
- 25 Statorabschnitt der Übertragungseinheit
- 26 Abschnitt der Welle
- 32 Öffnung, Fenster
- 34 Sicherungsorgan, Abdeckhülse
- 36 Halteorgan, Mutter
- 38 Lagerschild
- 39 Lagerung
- 42 Abdeckplatte
- 44 Auswuchtbohrung
- 45 Steckverbindung
- 46 Abdichtstopfen
- 48 Umsetzer
- 49 Baugruppe mit Gleichrichter und Entladeelektronik

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Auswuchten von rotierenden Gegenständen (12, 13), insbesondere in Bearbeitungszentren zur Bohr- und Fräsbearbeitung, mit wenigstens einem am rotierenden Gegenstand (12, 13) mit radialem Abstand von dessen Drehachse (14) und mit axialem Abstand von dessen freiem Ende anbringbaren Aktuator (16), der zum Einstellen einer Auswuchtkrümmung des Gegenstandes (12, 13) in Abhängigkeit von der gemessenen Unwucht zu axialen Stellbewegungen ansteuerbar ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Stellbewegungen Längenänderungen des Aktuators (16) sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator (16) zumindest ein piezoelektrisches Element umfaßt und insbesondere in Form eines Piezostapelaktuators vorgesehen ist.
4. Vorrichtung nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Aktuatoren (16) vorgesehen sind, die in Umfangsrichtung insbesondere gleichmäßig verteilt am rotierenden Gegenstand (12, 13) anbringbar sind.
5. Vorrichtung nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator (16) im Bereich einer Schnittstelle (18) zwischen einer Welle (12), insbesondere einer direkt antreibbaren Spindel, und einem auswechselbar mit der Welle (12) koppelbaren Werkzeug anbringbar ist, das bevorzugt an einem direkt mit der Welle (12) koppelbaren Träger (13) angebracht ist.
6. Vorrichtung nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator (16) an der Welle (12), insbesondere im Bereich der Außenwand der Welle (12), anbringbar ist, vorzugsweise in einem bezüglich einer Wellenlagerung (39) auskragenden Bereich der Welle (12).

7. Vorrichtung nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine insbesondere induktiv arbeitende Übertragungseinheit (23, 25) zur berührungslosen Übertragung von bevorzugt durch einen Mittelfrequenzverstärker verstärkten Stellsignalen für den Aktuator (16) vorgesehen ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Übertragungseinheit einen Rotorabschnitt (23) zur gemeinsamen Drehung mit dem rotierenden Gegenstand (12, 13) und einen bezüglich des rotierenden Gegenstandes (12, 13) stationären Statorabschnitt (25) umfaßt.
9. Vorrichtung nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Unwucht eine Meßanordnung vorgesehen ist, mit der den rotierenden Gegenstand (12, 13) betreffende Weg- bzw. Verschiebungs- und/oder Beschleunigungsdaten ermittelbar sind.
10. Bearbeitungsmaschine, insbesondere eines Bearbeitungszentrums zur Bohr- und Fräsbearbeitung, mit zumindest einem rotierenden Gegenstand (12, 13) und wenigstens einer zumindest einen Aktuator (16) umfassenden Auswuchtvorrichtung nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche.
11. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der rotierende Gegenstand eine Welle (12), insbesondere eine direkt antreibbare Spindel, und ein auswechselbar mit der Welle (12) koppelbares Werkzeug, insbesondere ein Werkzeug mit einem großen Länge/Durchmesser-Verhältnis, umfaßt, das bevorzugt an einem direkt mit der Welle (12) gekoppelten Träger (13) angebracht ist.
12. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator (16) in axialer Richtung zwischen einer Stirnfläche (15) des mit der Welle (12) gekoppelten Trägers (13) oder Werkzeugs und der Welle (12), bevorzugt einem vom werkzeugseitigen Wellenende axial beabstandeten Abschnitt (26) der Welle (12), angeordnet ist.
13. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator (16) über den mit der Welle (12) gekoppelten Träger (13) oder über das mit der Welle (12) gekoppelte Werkzeug vorgespannt ist.
14. Bearbeitungsmaschine nach zumindest einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator (16) in einem taschenartigen, bevorzugt zur Werkzeugseite hin offenen Aufnahmebereich des rotierenden Gegenstandes (12, 13), insbesondere der Welle (12), angeordnet ist, wobei vorzugsweise der Aufnahmebereich in Form einer Aussparung an der Außenwand des Gegenstandes (12, 13) vorgesehen ist.
15. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Aktuator (16) im Aufnahmebereich eingegossen ist.
16. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, daß in einer radial äußeren Begrenzungswand des Aufnahmebereiches zumindest eine Öffnung (32) ausgebildet ist.
17. Bearbeitungsmaschine nach zumindest einem der Ansprüche 10 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß der rotierende Gegenstand (12) im Bereich des Aktuators (16) von einem insbesondere einen Aufnahmebereich (28) für den Aktuator (16) verschließenden, hülsenförmigen Sicherungsorgan (34) umgeben ist.
18. Bearbeitungsmaschine nach zumindest einem der Ansprüche 10 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß sie für einen Hochleistungsbetrieb mit hohen Drehzahlen

ausgelegt und insbesondere mit maximalen Drehzahlen von mehr als 15.000 U/min, insbesondere mehr als 30.000 U/min betreibbar ist.

19. Verfahren zum Auswuchten von rotierenden Gegenständen (12, 13), insbesondere in Bearbeitungszentren zur Bohr- und Fräsbearbeitung, bei dem die Unwucht des rotierenden Gegenstandes (12, 13) gemessen und der rotierende Gegenstand (12, 13) mit wenigstens einem in Abhängigkeit von der gemessenen Unwucht ansteuerbaren Aktuator (16) gekrümmt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß der rotierende Gegenstand (12, 13) in einem von dessen Drehachse (14) radial und von dessen freiem Ende axial beabstandeten Bereich gekrümmt wird.

21. Verfahren nach Anspruch 19 oder 20, dadurch gekennzeichnet, daß es automatisch durchgeführt wird.

22. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß es während einer Beschleunigungsphase und/oder unmittelbar im Anschluß an die Beschleunigungsphase des Gegenstandes (12, 13) durchgeführt wird.

23. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß eine Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 9 verwendet wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

